

## ОТЗЫВ

официального оппонента Тимофеева Виктора Николаевича на диссертационную работу Соколова Игоря Владимировича «Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика

### Актуальность темы диссертации

В металлургии нашли широкое применение индукционные МГД устройства для транспортировки, перемешивания и кристаллизации расплавов. В основе работы этих устройств лежит воздействие на жидкий металл бегущим или вращающимся магнитным полем. По сравнению с другими способами воздействия на расплавы (механическим, ультразвуковым, вибрационным), воздействие электромагнитными полями обеспечивает бесконтактное перемешивание, перекачку и положительное влияние на разделительную диффузию на границе раздела твердой и жидкой фазы в процессе кристаллизации. Источником магнитного поля является индуктор, питаемый переменным многофазным током. Для эффективной работы МГД устройства в конкретном технологическом процессе требуются определенные параметры электромагнитного поля. Современные источники питания, основанные на полупроводниковых коммутационных аппаратах, позволяют регулировать параметры питающего напряжения или тока в широких пределах.

В данной работе исследуется структура магнитного поля МГД устройства при различных режимах питания индуктора, её влияние на характер течения в жидкометаллическом вторичном элементе. В этой связи работа является актуальной для разработки и проектирования МГД насосов, перемешивателей и кристаллизаторов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 116 страницах машинописного текста, список литературы содержит 114 наименований.

### Структура и содержание диссертационной работы

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы научные положения, их новизна и практическая значимость.

**В первой главе** описаны современные подходы к повышению эффективности перемешивания расплава, определено перспективное направление исследования. Для численного моделирования магнитогидродинамических процессов выбран программный пакет COMSOL Multiphysics. Показана возможность использования метода симметричных составляющих для анализа влияния линейной токовой нагрузки индуктора на усилия в расплаве. Принято решение оценить эффективность перемешивания



проводить по распределению пассивной примеси. Приведено описание исследуемой установки с линейным индуктором и ванны с расплавом.

**Во второй главе** показано, что связанную магнитогидродинамическую задачу можно разделить на две задачи, электромагнитную и гидродинамическую. Для решения уравнений электромагнитного поля и уравнений Навье – Стокса использован программный пакет COMSOL Multiphysics. Численная модель гидродинамических процессов дополнена уравнением примесей при помощи модуля «Transport of Diluted Species». Достоверность принятых допущений и результатов численного моделирования подтверждается сравнением с экспериментальными результатами по усилиям и скоростям расплава.

**Третья глава** посвящена исследованию влияния угла сдвига фаз токов индуктора на усилия и характер течений расплава. Показано, что с помощью управления фазовым сдвигом можно увеличить интенсивность перемешивания и обеспечить более равномерное распределение пассивной примеси.

**В четвертой главе** предложено использование для анализа магнитогидродинамических процессов в системе индуктор – ванна с расплавом метода симметричных составляющих. Метод позволяет упростить расчет и анализ электродинамических усилий в расплаве. Выявлено, что основной вклад в создание тангенциальных усилий в расплаве вносит бегущее магнитное поле, создаваемое прямой составляющей токов питания индуктора, обратной составляющей, а также взаимодействие этих бегущих полей с пульсирующим полем от нулевой составляющей токов питания. Получены карты зависимости времени эффективного перемешивания от управляющих параметров. Определены режимы, при которых эффективность перемешивания увеличивается до двух раз по сравнению с перемешиванием одиночным бегущим магнитным полем.

**В заключении** представлены основные результаты исследований в диссертационной работе и сформулированы перспективы дальнейшей разработки темы.

### **Научная новизна и достоверность результатов исследований**

К наиболее значимым научным результатам диссертационной работы соискателя можно отнести:

1. Установлена связь изменения начального сдвига фаз токов питания линейного индуктора с характером течения в жидкометаллическом вторичном элементе.

2. Для анализа течений во вторичном элементе перемешивателя с линейным индуктором впервые применен метод симметричных составляющих, упрощающий учет индуцированных усилий.

3. Показано, что основной вклад в возникновение разнонаправленных усилий в расплаве вносит суммарный магнитный поток, полученный наложением бегущего и пульсирующего магнитных полей, что, в свою очередь, вызывает появление разнонаправленных течений.



4. Определена зависимость характера течения, скорости распределения примеси в жидкометаллическом вторичном элементе электромагнитного перемешивателя от соотношения и фазового сдвига симметричных составляющих токов линейного индуктора.

5. Сформированы рекомендации по выбору возможных режимов работы электромагнитных перемешивателей с бегущим магнитным полем, учитывающие соотношение симметричных составляющих токов питания индуктор.

Обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы соискателя подтверждается применением классических методов магнитогидродинамики, корректностью принятых допущений, согласованностью результатов математического моделирования и физического эксперимента.

### **Ценность для науки и практики**

Ценность проведенной диссертационной работы для науки и практики выражается в подходе к работе с численными моделями, который учитывает влияние несимметрии питания на физические процессы во вторичном жидкометаллическом элементе при воздействии на него неравномерного бегущего магнитного поля индуктора. Для анализа течений возможно производить разложение токов индуктора методом симметричных составляющих и анализировать суммарное поле как сумму бегущего магнитного поля в прямом направлении, обратном направлении и пульсирующего магнитного поля, которые создаются соответственно прямой, обратной и нулевой составляющими токов индуктора. С практической точки зрения, в данной работе приводятся положения, которые можно применить для формирования многовихревых течений сложной конфигурации, а также для управления распределением примеси в объеме и ускорения процессов теплообмена. Таким образом, результаты, изложенные в диссертационной работе, могут быть использованы для упрощения расчетов режимов работы, а также при проектировании линейных индукционных машин с жидкометаллическим вторичным элементом и источников питания к ним.

### **Реализация результатов диссертационного исследования**

С практической точки зрения, в данной работе приводятся положения, которые можно применить для формирования многовихревых течений сложной конфигурации, а также для управления распределением легирующих элементов в объеме ванны с расплавом и ускорения процессов.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе дисциплины «Общая электротехника» в разделе электрические машины.

Результаты работы отражены в трех статьях: из них в двух статьях в журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования Scopus и Web of Science, и в одной статье в материалах конференций,



индексируемых в международных базах научного цитирования Scopus и Web of Science.

Содержание автореферата в достаточной степени отражает содержание диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе:

1. Структура магнитного поля индуктора определяется временными и пространственными гармониками, первые зависят от формы токов в фазах, а вторые от количества, размеров и расположения пазов. Неясно позволяет ли построенная автором математическая модель варьировать этими параметрами.

2. При математическом моделировании МГД перемешивания жидкой сердцевины кристаллизующегося слитка необходимо знать форму жидкой лунки, неясно как определялась эта форма если тепловые процессы в модели не рассматривались.

3. Неясно, что автор понимает под термином «время эффективного перемешивания «стр.93-96».

4. Автор не сформулировал четкие рекомендации для проектирования индуктора и выбора источника питания для проектирования МГД перемешивателя с заданным характером течения расплава.

5. Автор допускает неточности в названии векторов электромагнитного поля, например, на стр.18 вектор  $\mathbf{E}$  назван вектором электрического поля, а вектор  $\mathbf{B}$  назван вектором магнитного потока, на стр.34, входящий в векторное произведение (1.15)  $\mathbf{J}$  назван током.

6. В тексте диссертации присутствуют орфографические ошибки, вероятно отсутствовала первичная корректура работы

### Заключение

Отмеченные недостатки не изменяют общей положительной оценки диссертации, которая обобщает достигнутые результаты научной и практической деятельности автора и представляет собой комплексное завершённое исследование, выполненное автором самостоятельно.


Диссертация может квалифицироваться как содержащая новое решение задачи, имеющей существенное значение для проектирования МГД устройств металлургического назначения.

Считаю, что диссертационная работа Соколова Игоря Владимировича «Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов» удовлетворяет всем требованиям, установленным в пункте 9 Положения о присуждении ученых степеней ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» к кандидатским диссертациям. Представленная работа соответствует специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.



Автор диссертационного исследования «Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов» Соколов Игорь Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Официальный оппонент,  
д-р техн. наук, профессор,  
профессор кафедры «Электротехника»  
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный  
университет»

 Тимофеев Виктор Николаевич

12 сентября 2022 г.

660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79,  
м. тел. +7 902 990 48 94 почта viktortim0807@mail.ru

Подпись Тимофеева В.Н. заверяю  
Ученый секретарь ученого совета  
Сибирского федерального университета,  
к.ю.н., доцент Макарчук И.Ю.

